

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.12.1207>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## P-S-N선도를 이용한 진동리퍼 기어박스-생크 용접부의 피로수명 평가<sup>§</sup>

오광근\* · 김재훈\*<sup>†</sup> · 박정렬\*\* · 양규상\*\* · 박종원\*\*\* · 김성현\*\*\*

\* 충남대학교 기계설계공학과, \*\* (주) 대동 ENG, \*\*\*한국기계연구원

### Evaluation of Fatigue Life of Welded Joint of Gear Box-Shank in Vibro Ripper Using P-S-N Curve

Kwang Keun Oh\*, JaeHoonKim\*<sup>†</sup>, Jung Yeol Park\*\*, GyuSangYang\*\*, JongWonPark\*\*\* and Sung Hyun Kim

\* Dept. of Mechanical Design Engineering Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

\*\* Dae Dong Engineering Co., Ltd.,

\*\*\* Korea Institute of Machinery & Materials.

(Received March 31, 2015 ; Revised October 14, 2015 ; Accepted October 14, 2015)

**Key Words:** High-Frequency Vibration(고주기 진동), P-S-N Curve(P-S-N 선도), Vibro Ripper(진동리퍼), Fatigue Test(피로시험), Cruciform Fillet Welding(십자 필렛 용접)

**초록:** 진동리퍼는 암반의 파쇄와 리핑 작업을 동시에 하기 위해서 개발된 장비이며 기존의 암반 파쇄용 유압 브레이커와 작동 원리가 다르다. 진동리퍼의 기진력을 투스로 전달하는 기어박스-생크 용접부는 매우 중요한 부분이며 진동리퍼의 기계적 건전성의 예측이 필수적이다. 본 연구는 생크소재 및 용접재료의 변화에 따른 용접부의 피로수명 예측을 목적으로 하고 있다. 생크의 재료는 Hadox-hituf, AR 400을 사용하였고 용접금속은 CSF-71T, CSF-81T를 사용하였다. 피로시험은 응력비 R=0에서 각 재료조건에 대해서 수행하였다. P-S-N 선도는 JSME-S002 규정에 맞춰 파괴확률 10%, 50%, 90%에 대해서 나타냈으며 수명 예측 식을 도출하였다.

**Abstract:** A vibro ripper utilizes high-frequency vibration for rock fragmentation. This concept is different from those used by other existing breakers. The gearbox-shank welded joint of a vibro ripper is a very important part. Because it delivers the vibromotive force to the tooth, it is important to predict its soundness. This study was conducted to predict the fatigue life under welding conditions. The shank materials were Hardox-Hituf and AR400, and the filler metals were CSF-71T and CSF-81T. Fatigue tests were conducted under each set of conditions. P-S-N curves are presented based on the statistical testing method recommended by JSME-S002, and a comparison is made of the results under each set of conditions. The life was estimated using a P-S-N curve.

#### 1. 서론

최근 도심에서 도로 보수 건축물 해체 등의 작업이 늘어나면서 중장비의 수요도 늘어나고 있다. 하지만 중장비에서 발생하는 소음이 심하여 관련 법규에 의해서 사용이 제한 받고 있는 상황

이다. 이 때문에 중장비들의 작동 소음을 줄이는 연구가 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

최근 국내 개발된 진동리퍼는 편심회전으로 고주기 진동을 형성하여 암반을 파쇄하는 장비로서 기존의 유압을 이용하던 유압브레이커 보다 적은 소음을 발생시킨다. 또한 진동을 통해서 암반의 절리에 균열을 발생시킨 뒤 이를 지렛대의 원리로 뜯어내는 리핑 작업이 가능하여 작업 효율이 높다. 하지만 고주기의 진동을 이용하여 지속적인 충격을 가하는 장

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

비인 만큼 피로파괴의 위험에 노출되어 있다. 본 연구에서는 진동 리퍼의 핵심 중 하나인 기어박스-생크 용접 부의 피로강도에 관한 연구를 진행하였다. 진동리퍼의 동력발생장치인 기어박스와 힘을 투스에 전달하는 생크는 용접에 의해서 연결되어 있다.

기어박스와 생크의 용접 부는 제작시간과 비용의 문제로 인하여 구조물의 용접 중 루트 부까지 접근이 곤란하기 때문에 불완전 용입이 불가피하다.<sup>(3)</sup> 이러한 경우 리퍼의 파괴는 반복적인 하중에 의하여 미 용입에 의한 균열을 포함한 용접 부에서 균열이 진전해서 최종파단에 이를 것으로 예측된다.<sup>(4)</sup> 그러므로 진동리퍼의 작동 수명을 정확히 예측하고 이를 토대로 보수작업을 함으로서 갑작스러운 사고로 인한 물적, 인적 피해를 줄이는 것이 중요하다.

본 연구에서는 기어박스-생크 용접부의 형상을 잘 표현할 수 있는 불완전 용입 십자 필렛용접 시편을 이용하여 동일한 용접 조건하에서 생크와 용착금속의 소재 변화에 따른 피로시험을 수행하여 재료 변화에 따른 피로수명 증가 방법을 연구하고 이를 토대로 각 조건 별 피로 수명 예측 식을 만들고 P-S-N선도(Probability S-N curve)를 이용한 신뢰성 평가를 통해서 진동리퍼의 기어박스-생크 용접부의 피로강도 설계 기준을 제시하였다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 실험재료 및 시편

기어박스의 소재인 Posten80은 내후성이 뛰어난

**Table 1** Mechanical properties of base and filler metal

Type	Material	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	Elongation (%)
Base	AR400	1,100	1,360	14.4
	Hardox-Hituf	950	980	16
Filler	CSF-81T	620	658	28
	CSF-71T	517	574	29

**Table 2** Chemical compositions of base and filler metal

Type	Material	C	Mn	Ni	Si	Fe
Base	AR400	0.20	1.60	2.0	0.50	Bal.
	Hardox-Hituf	0.28	0.75	0.1	0.43	
Filler	CSF-81T	0.05	1.25	-	0.58	
	CSF-71T	0.05	1.30	0.95	0.40	

고장력 강으로서 건설장비에 주로 사용된다.<sup>(5)</sup>

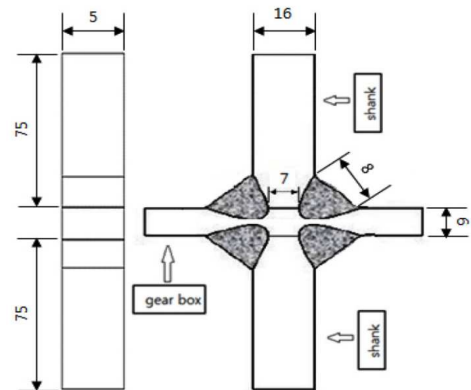
Hardox-hituf와 AR400은 내마모성이 우수하여 굴착장비로 사용되는 중장비에서 주로 사용된다.

용착 금속은 CO2아크 용접에 사용되는 플러스 코드와이어(flux cord wire) CSF-71T와 CSF-81T를 이용하였다. Table 1은 생크 및 용착 금속 소재의 기계적 특성을 보여주고 Table 2는 화학조성비를 나타낸다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 피로시험편이다. 그림과 같이 가운데는 기어박스, 상하부는 생크 소재로 구성되어있으며 실제 용접 상태와 일치시키기 위해서 미 용입 길이를 7 mm로 하였고 실제 진동 리퍼의 용접 조건과 같게 용접되었다.

### 2.1 인장시험

각 조건 별 용접부의 기계적 특성을 알아보기 위해서 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 모두 변위 일정시험으로 2 mm/min의 속도를 유지하여



**Fig. 1** Geometry of cruciform fillet welding specimen



**Fig. 2** Fatigue testing machine(EHF-10ED-40)

수행하였으며 시험장비는 Fig. 2와 같이 만능유압 시험기(EHF-10ED-40)를 이용하여 수행되었다.

2.2 피로시험

피로 시험은 인장시험과 마찬가지로 Fig. 2와 같이 만능유압시험기를 이용하여 수행되었다. 하중범위는 십자용접시편의 인장강도 기준 30 % ~ 70 %의 범위를 설정하였고 응력 비( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ )를 0인 조건으로 상온에서 수행하였다. 이때 하중파형은 10Hz의 정현 파로 설정하였다. 피로한도인  $N = 10^7$  cycle를 넘으면 무한수명으로 판단하고 시험을 중단하였다. 피로시험 수행 후 JSME-S002에서 제시한 통계적 기법에 따라 파괴확률 10%, 50%, 90%의 P-S-N선도 (Probability S-N curve) 를 작성하였다.<sup>(6)</sup>

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

인장시험을 통해서 미 용입 길이 7 mm를 가지는 십자필렛 용접시편의 인장시험을 통해서 Fig. 3와 같은 결과를 얻었다.

인장시험 결과 Hardox-hituf와 CSF-81T 용착금속을 이용한 시험편의 인장강도가 602.7 MPa로 가장 높았고 AR400과 CSF-81T를 이용한 조건이 592.4 MPa로 두 번째로 높다. CSF-71T용착금속을 이용한 시험 편은 Hardox-hituf가 551.9 MPa이고 AR400가 485.6 MPa로 가장 낮게 나타났다. 이를 통해서 용접시편의 인장강도는 CSF-81T, Hardox-hituf를 이용할 때 높다는 것을 알 수 있다. 모재의 인장강도가 가장 높은 AR 400은 용접 인장시험을 통해서 용접강도가 낮다는 것을 나타낸다.

3.2 피로시험 결과

피로시험을 통해서 샙크와 용착 금속의 소재에

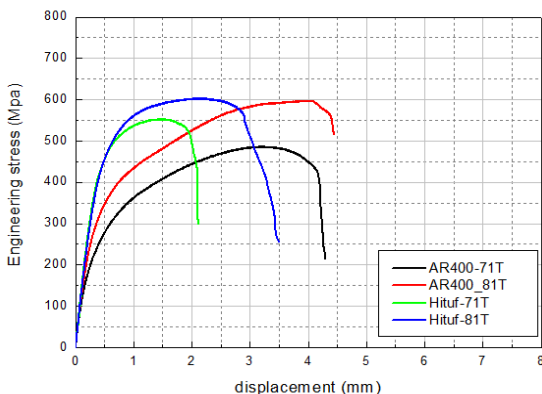
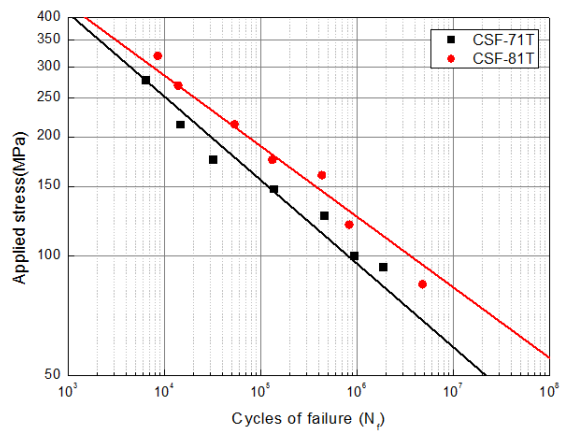


Fig. 3 Tensile tests of cruciform fillet welding specimens

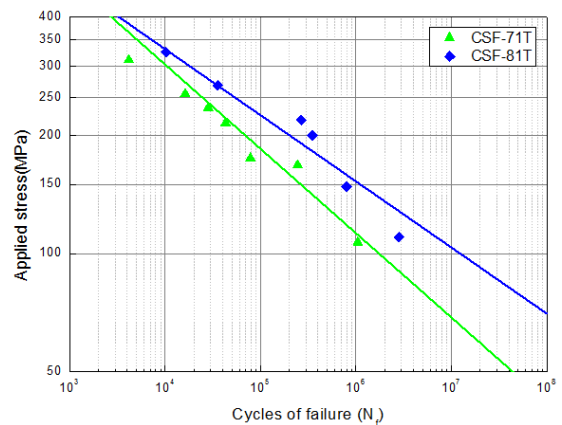
따라 총 4가지 S-N선도를 얻었으며 피로수명이 가장 높은 조건을 도출하였다. 피로시험은  $N = 10^7$  cycle을 피로한도로 설정하고 이를 넘으면 무한수명으로 판단하였다.

Fig. 4는 용착금속 소재의 변화에 따른 피로시험의 결과이다. Fig. 4를 통해서 샙크 소재와 상관없이 용착금속을 CSF-81T를 사용했을 때 CSF-71T보다 대략 20 MPa이상의 높은 피로강도를 가진다는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 CSF-81T가 용접조건에서 피로강도가 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 동일한 용착 금속에서 샙크 소재 변화에 따른 S-N선도이다. 피로강도 비교결과 용착금속에 상관없이 Hardox-hituf가 높은 피로강도를 가진다. 용접 인장시험과 마찬가지로 높은 모재 인장강도를 가지는 AR400이 가장 낮은 피로강도를 가지는 것은 용접피로특성이 Hardox-hituf에 비해 좋지 않은 것으로 나타났다.



(a) AR400



(b) Hardox-hituf

Fig. 4 Results of fatigue test of each shank material

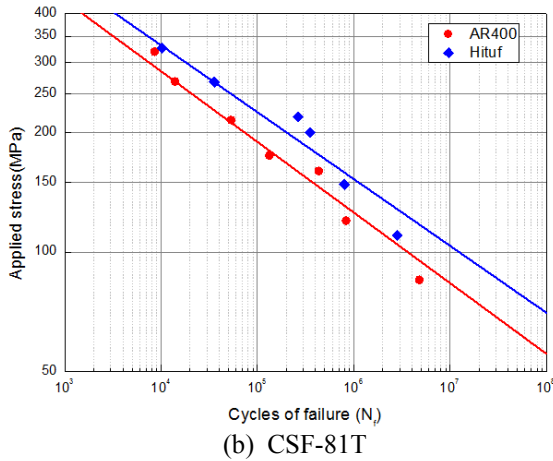
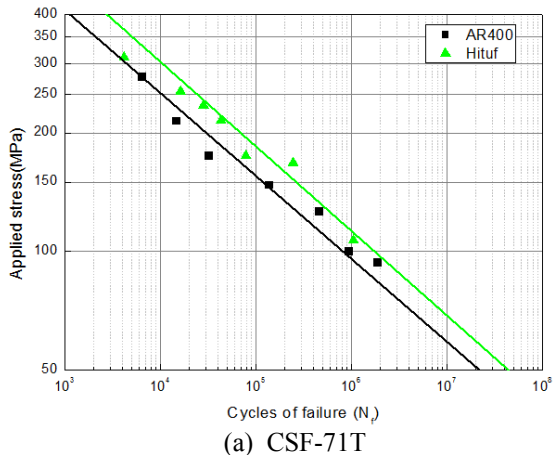


Fig. 5 Results of fatigue test for filler metal

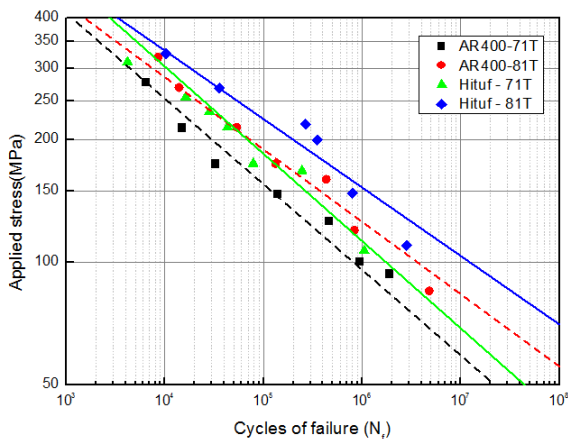


Fig. 6 Results of fatigue test of all conditions

Fig. 6은 모든 조건에 대한 피로시험 결과이다. 여기서 피로강도는 용착금속 CSF-81T를 이용한 조건에서 높게 나타난다. 이를 통해서 생크소재 보다는 용착금속이 피로강도 변화에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

CSF-71T는 CSF-81T보다 Si를 많이 함량하고

Table 3 Basquin equations of all conditions

Base	Filler	Equation
AR400	CSF-81T	$S=1470.62 \times N_f^{-0.1780}$
	CSF-71T	$S=1757.52 \times N_f^{-0.2106}$
Hardox-hituf	CSF-81T	$S=1566.75 \times N_f^{-0.1685}$
	CSF-71T	$S=2192.30 \times N_f^{-0.2148}$

Table 4 Factors of P-S-N for all conditions

Base	Filler	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\hat{\sigma}(\text{Log}N_f)$
AR400	CSF-81T	17.794	-5.617	0.2246
	CSF-71T	15.408	-4.748	0.2194
Hardox-hituf	CSF-81T	18.961	-5.934	0.3519
	CSF-71T	14.543	-4.247	0.2378

있다. 그래서 CSF-71T로 용접시 O<sub>2</sub>, Si가 주를 이루는 비금속 개재물이 CSF-81T보다 많이 형성된다. 이 비금속 개재물은 미세노치를 형성함으로써 피로수명을 단축시키는 역할을 한다.<sup>(7)</sup>

Table 3는 Basquin equation을 이용해서 각 시험 조건 별 피로수명 예측식을 도출 한 것이다.

### 3.3 P-S-N선도

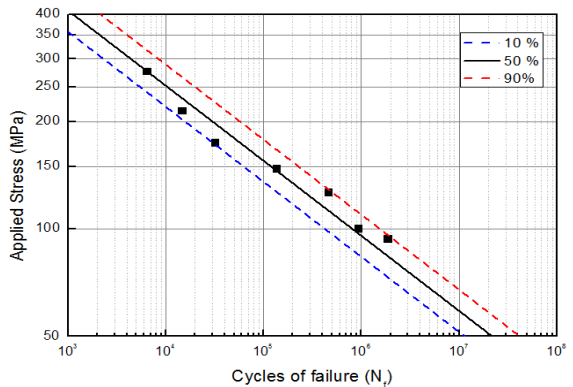
기어박스-생크 용접부의 피로시험 결과에 대한 신뢰성 평가를 위해서 확률 분포 P-S-N선도를 작성하였다.

$$\text{Log}N_f = \alpha_2 + \beta_2 \text{Log}(\Delta\sigma) \quad (1)$$

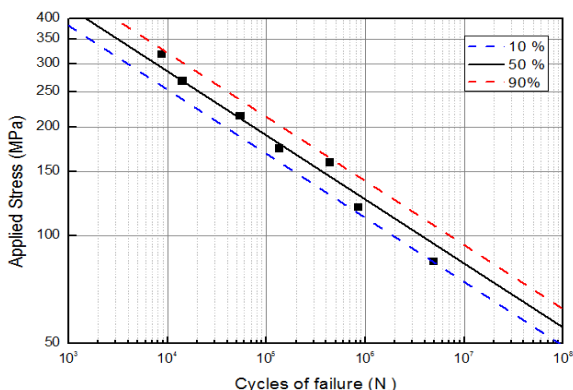
$$\text{Log}N_f = \alpha_2 + \beta_2 \text{Log}(\Delta\sigma) \pm 1.28\hat{\sigma}(\text{Log}N_f) \quad (2)$$

피로시험에서 각 조건 별 얻은 데이터를 이용하여 계수  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  그리고 표준편차  $\hat{\sigma}(\text{Log}N_f)$ 를 구하였으며 Table 4에 나타냈다. 식 (1)로 파괴확률 50%의 P-S-N 선도를 구할 수 있었으며 식 (2)를 통해서 파괴확률 10% 및 90%의 P-S-N선도를 나타낼 수 있다.

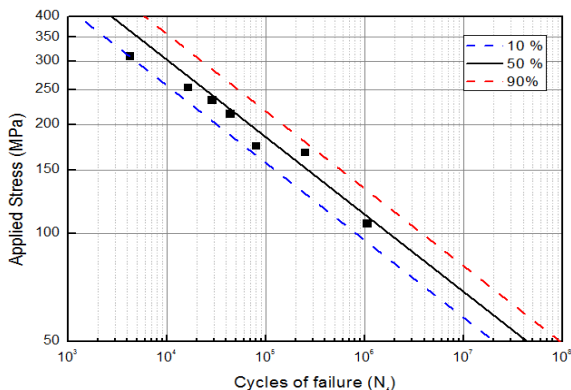
Fig. 7는 각 조건 별 시험 결과에 대한 P-S-N선도를 나타낸 것이다. 모든 선도에서 가운데 실선은 파괴확률 50%를 나타내고 점 쇄선은 파괴확률 90%, 점선은 10%의 선도를 각각 나타낸다.



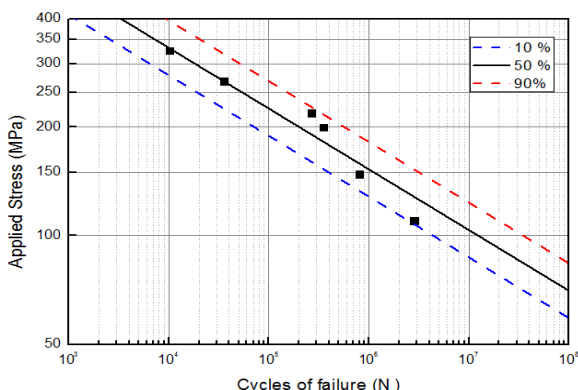
(a) AR400 - 71T



(b) AR400 - 81T



(c) Hardox-hituf - 71T



(d) Hardox-hituf - 81T

Fig. 7 P-S-N curves of each conditions

Table 5 Fatigue limits of 50% probability of failure

Base	Filler	Fatigue limit(MPa)
AR400	CSF-81T	125.75
	CSF-71T	95.78
Hardox-hituf	CSF-81T	152.75
	CSF-71T	112.75

모든 조건의 결과가 파괴확률 10%, 90% 선도 내에 밀집함을 알 수 있다.

피로한도의 기준을  $N=10^6$  cycle로 정하였을 때 각 조건의 파괴확률 50%의 피로한도는 Table 5에 나타내고 있다.

피로한도를 비교한 결과 동일 생크 소재에서 용착 금속을 CSF-81T를 이용했을 때 피로강도가 CSF-71T보다 약 31~35% 높았으며 동일 용착 금속을 사용했을 때 Hardox-hituf의 피로한도가 AR400보다 약 17~21% 높다.

생크 소재인 Hardox-hituf와 용착 금속 CSF-81T를 사용한 조건의 피로한도가 108.77 MPa로 가장 높으며 가장 낮은 피로한도인 58.98 MPa를 가지는 AR400과 CSF-71T를 사용한 조건보다 약 59% 높게 나타났다.

본 연구를 통해 얻은 P-S-N 선도는 기어박스-생크 용접부의 피로강도 설계기준으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 진동 리퍼의 기어박스-생크 용접부의 피로수명 특성을 파악하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 십자필렛용접에 대한 인장시험을 수행한 결과에서 생크소재는 Hardox-hituf, 용착금속은 CSF-81T를 사용했을 때 가장 높은 인장강도이다.
- (2) 각 소재변화 조건별 피로시험을 수행한 결과에서 생크소재는 Hardox-hituf, 용착금속은 CSF-81T를 사용했을 때 가장 높은 피로강도이다. 각 재료에 대한 피로수명 예측식을 제시하였다.
- (3) 피로강도의 증가는 생크 소재보다 용착금속의 변화에 큰 영향을 받는다.
- (4) P-S-N 선도를 이용한 신뢰성평가 결과는 파괴확률 10%, 90% 선도의 안전영역에 있어 본 결과의 신뢰성을 입증하고 있으며, 이를 토대로 피

로강도설계 기준을 제시할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 (주)대동ENG의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, J.H., Ih, J.G., Park, S.H., Ha, T.G. and Lim, J.H., 2001, "Vibro-acoustic Design and Development of a Low-noise Hydraulic Breaker," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 148~155.
- (2) Park, G.B., Park, C.H., Park, Y.S. and Choi, D.H., 2011, "Optimal Design of Minimizing Weight of Housing of Hydraulic Breaker," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.35, No.2, pp. 207~212.
- (3) Balasubramanian, V. and Guha, B., 1999, "Influence of Weld Size Fatigue Crack Growth Characteristics of Flux Cored arc Welded Cruciform Joints," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 265, Issues 1~2, pp.7~17.
- (4) Lee, Y. B., 2012, "A Study on Characteristics of Fatigue Life in LOP Cruciform Fillet Welding Zone," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 3, pp.29~34.
- (5) Chang, K. H. and Lee, C. H., 2007, "Residual Stresses and Fracture Mechanics Analysis of a Crack in Welds of High Strength Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, Issue 6, pp. 980~994.
- (6) JSME S002, 1994, "Standard Method Statistical Ftigue Testing," *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, pp. 10~42.
- (7) Oh, K. K., Kim, J. H., Kim, Y. W., Park, J. Y., Yang, G. S., Park, J. W. and Kim, S. H., 2014, "Fatigue Characteristics on Welded Joint of Gear Box-Shank in Vibro Ripper for Rock Crash," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 6, pp. 28~33.